



⑮ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nl gungsschrift  
⑩ DE 195 21 387 A 1

⑤ Int. Cl.<sup>8</sup>:  
H 05 H 1/46  
H 03 H 7/40  
G 05 B 13/02

⑳ Aktenzeichen: 195 21 387.4  
㉔ Anm ld tag: 13. 6. 95  
㉕ Offenlegungstag: 19. 12. 96

DE 195 21 387 A 1

㉑ Anmelder:  
Balzers und Leybold Deutschland Holding AG, 63450  
Hanau, DE

㉒ Vertreter:  
Schickedanz, W., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 63073  
Offenbach

㉓ Erfinder:  
Gesche, Roland, Dr., 63500 Seligenstadt, DE; IBL,  
Vladimir, Dipl.-Ing., 61352 Bad Homburg, DE

㉔ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht zu ziehende Druckschriften:

DE 42 41 941 C1  
DE 19 15 760 B2  
DE 39 23 662 A1  
US 53 02 882  
US 51 40 223  
US 48 64 490

GOSER, K.: Fuzzy-Technik: Unscharfe Regler für  
komplexe Systeme. In: Phys., Bl. 50, 1994, Nr. 11,  
S. 1064-1067;

UNBEHAUEN, Heinz: Regelungstechnik III,  
Identifikation, Adaption, Optimierung, Friedr.  
Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden, 1985,  
S. 136-143;

JP Patents Abstracts of Japan: 4-291601  
A., P-1494, Febr. 26, 1993, Vol. 17, No. 98;  
1-94401 A., P-904, July 25, 1989, Vol. 13, No. 329;  
1-119802 A., P-917, Aug. 11, 1989, Vol. 13, No. 361;

㉕ Verfahren zum automatischen Abstimmen eines Anpassungsnetzwerks, das zwischen einer elektrischen  
Energiequelle und einer Last angeordnet ist

PTO 2002-3952

S.T.I.C. Translations Branch

DE 195 21 387 A 1

Die Erfindung ein Verfahren nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

In Anlagen zum Aufbringen und Abtragen von dünnen Schichten hat die Plasmaerzeugung mittels Hochfrequenz weite Verbreitung gefunden. Dabei muß die variable Impedanz des Plasmas auf die feste Lastimpedanz eines 13,56-MHz-Hochfrequenzgenerators, die beispielsweise 50 Ohm beträgt, transformiert werden. Zu diesem Zweck sind Anpassungsnetzwerke üblich, die zwischen dem Hochfrequenzgenerator und der Plasma-  
strecke angeordnet sind. Diese Anpassungsnetzwerke weisen variable Spulen und/oder Kondensatoren auf, die mit der Hand verstellt werden, um eine Anpassung vorzunehmen.

Es ist bereits ein Verfahren zum Regeln eines Plasma-  
prozesses bekannt, bei dem die Impedanzänderung der Hochfrequenzleistung angezeigt wird (US-A-4 207 137). Hierbei ist ein Impedanzaufnehmer als Phasen- und Betragsdetektor ausgeführt. Dieser Aufnehmer weist induktive Stromaufnehmer auf, die nur schwer vor kapazitiven Einkopplungen geschützt werden können. Eine automatische Anpassung wird durch den Impedanzaufnehmer nicht erzielt.

Bei einer anderen bekannten Anpassungsschaltung für die Zuführung von hochfrequenter elektromagnetischer Energie auf eine variable Impedanz sind mehrere abstimmbare Kondensatoren und abstimmbare Induktivitäten vorgesehen (US-A-4 679 007). Hierbei werden induktiv arbeitende Aufnehmer und Phasenauswertungen verwendet, die Nachteile aufweisen.

Weiterhin ist ein automatischer Antennenkoppler bekannt, der ein System verwendet, bei dem der reelle Teil einer komplexen Impedanz oder Admittanz gemessen wird, der von einer Antenne oder einem Netzwerk bereitgestellt wird (US-A-3 913 644). Als Meßwertaufnehmer wird hierbei ein induktiver Stromwandler verwendet.

Schließlich ist auch noch eine Schaltungsanordnung zum automatischen Abstimmen eines Anpassungsnetzwerks bekannt, bei welchem zwei elektrische Größen am oder im Anpassungsnetzwerk gemessen und einer Regeleinrichtung zugeführt werden (DE-A-39 23 662). Die Regeleinrichtung bildet hieraus die Beträge von drei elektrischen Größen und verstellt aufgrund dieser Größen die Induktivitäten und/oder Kapazitäten des Anpassungsnetzwerks. Es wird hierbei also ein Hochfrequenzgenerator über eine Koaxialleitung mit einem Anpassungsnetzwerk, einer sogenannten Matchbox, verbunden, an dessen Ausgang die Kathode angeschlossen ist. Am Eingang des Anpassungsnetzwerks befindet sich ein Meßaufnehmer, z. B. ein Phasen-Betrag-Detektor, der zwei Signale bildet, die eine Aussage über die Fehlanpassung der Matchbox enthalten. Diese Signale werden dem Regler zugeführt, der Stellgrößen für typischerweise zwei motorisch verstellbare Kondensatoren der Matchbox liefert. Nachteilig ist hierbei, daß das Kennfeld der Anpassung von der Lastimpedanz abhängt, aber eine Anpassung der Regelstrategie an die Lastimpedanz nicht möglich ist. Dadurch neigt die Regelung bei manchen Lasten zum Schwingen oder zu unzureichender Minimierung. Manchmal ist es erforderlich, den Abgleich für verschiedene Lastfälle zu wiederholen, was die Flexibilität einschränkt. Bisweilen neigen die Regler auch zum Weglaufen, was nicht immer durch einen Neuabgleich zu beseitigen ist.

Bei Fehlanpassungen findet das Autotuning den An-

passungsbereich nicht, da einerseits die Kennfelder für den Fehlanpassungsbereich sehr komplex und durch die Regler nicht nachzuvollziehen sind und andererseits die gebräuchlichen Aufnehmer für Fehlanpassungen keine hinreichend aufgelöste zweidimensionale Aussage im komplexen Impedanzfeld des Smith-Diagramms mehr liefern.

Ein aktiver Aufnehmer mit hoher Dynamik und einer verbesserten Regelstrategie, wie er aus der erwähnten DE-A-39 23 662 bekannt ist, bringt Verbesserungen, aber keine perfekte Lösung, da die Anforderungen an die Lastimpedanzen gerade bei sehr großen Kathoden immer weiter steigen. Mikrocomputergesteuerte Regler können die Probleme allein ohne verbesserte Meßaufnehmer auch nicht lösen.

Der Erfindung liegt deshalb die Aufgabe zugrunde, eine stabile Anpassungsschaltung zu schaffen, welche die vorstehend beschriebenen Nachteile nicht aufweist.

Diese Aufgabe wird gemäß den Merkmalen des Patentanspruchs 1 gelöst.

Der mit der Erfindung erzielte Vorteil besteht insbesondere darin, daß es nicht erforderlich ist, hochgenau abzugleichende und damit teure Meßaufnehmer einzusetzen, die über den ganzen Dynamikbereich arbeiten. Auch ist es nicht erforderlich, numerisch extrem aufwendige Regel-Simulationen vorzunehmen, die am Ende die Meßunsicherheiten noch verstärken würden.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und wird im folgenden näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine Anpassungsschaltung für eine variable Lastimpedanz mit einer zugehörigen Regelschaltung; und

Fig. 2 eine Anordnung für die Erzeugung von Regelgrößen aus den gemessenen Größen.

In der Fig. 1 ist ein Hochfrequenzgenerator 1 dargestellt, der auf einer Frequenz von 13,56 MHz schwingt und über ein Anpassungsnetzwerk 2 mit einer variablen Lastimpedanz 3 in Verbindung steht. Das Anpassungsnetzwerk 2 weist drei Kondensatoren 4, 5, 6 im Längszweig und zwei Parallelschwingkreise 7, 8 im Querszweig auf. Diese Schwingkreise 7, 8 bestehen aus jeweils einem variablen Kondensator 9, bzw. 10 und einer festen Spule 11 bzw. 12, wobei der Schwingkreis 8 mit seinem einen Anschluß an Masse 13 und mit seinem anderen Anschluß zwischen den Kondensatoren 5 und 6 liegt, während der andere Schwingkreis 7 mit seinem einen Anschluß ebenfalls an Masse 13 liegt, aber mit seinem anderen Anschluß mit dem Kondensator 4 und 5 in Verbindung steht.

An der Anpassungsschaltung 2 werden zwei verschiedene Größen abgegriffen und einer Regeleinheit 14 zugeführt. Es handelt sich bei diesen Größen um die Spannung  $U_E$ , die am Ausgang des Hochfrequenzgenerators 1 ansteht, sowie um die Spannung  $U_1$ , die am Parallelschwingkreis 7 anliegt. Diese Spannungen  $U_E$  und  $U_1$  werden über kapazitive Spannungsteiler 15, 16, die jeweils zwei Kondensatoren 17, 18 bzw. 19, 20 enthalten, der Regeleinheit 14 zugeführt, welche die beiden Regelgrößen  $x_1$  und  $x_2$  abgibt. Diese Regelgrößen  $x_1$  und  $x_2$  werden in Verstärkern 21, 22 verstärkt und auf Stellmotore 23, 24 gegeben, welche eine Verstellung der Kondensatoren 9 bzw. 10 vornehmen. Die Kondensatoren 9, 10 werden dabei so verstellt, daß das Anpassungsnetzwerk 2 stets einen Widerstandswert  $Z_{E_{\text{eff}}}$  einnimmt, der dem Innenwiderstand des Hochfrequenzgenerators entspricht. Im Anpassungsfall muß  $Z_E$  reell sein und 50 Ohm betragen. Daraus ergibt sich die Anpassungsbe-

dingung für  $Z_{1\text{sol}}$ , also den Widerstandswert, der bei  $U_1$  auftreten soll, zu 50 Ohm minus der Impedanz des Festkondensators 4. Da diese komplex ist, liefern die Beträge der beiden Impedanzen eine Aussage über Real- und Imaginärteil des Reflexionsfaktors bzw. der Eingangsimpedanz.

Neu hinzu kam jedoch, daß nun auch die Spannung an Ausgangskondensatoren 6 abgegriffen und über die Kondensatoren 46, 47 bzw. 48, 49 der Regeleinheit als Signale  $\sim U_1$  und  $\sim U_2$  zugeführt werden.

In der Fig. 2 ist die prinzipielle Funktionsweise der Regeleinheit 14 näher dargestellt. Man erkennt dort, daß die Signale

$\sim U_E$  und  $\sim U_1$

jeweils einem Bandpaßfilter 27, 28 zugeführt sind. Die Übertragungsfunktionen dieser Filter 27, 28 und die Übertragungsfunktionen der Spannungsteiler 15, 16 sind hierbei phasengleich, was durch einen entsprechenden Abgleich leicht durchführbar ist. Die Ausgangssignale der beiden Bandpaßfilter 27 und 28 werden auf einen Subtrahierer 26 gegeben, dem ein Gleichrichter 29 nachgeschaltet ist, dessen Ausgangssignal zwei Dividierern 30, 31 zugeführt ist. Weiterhin wird das Ausgangssignal des Bandpaßfilters 27 einem Gleichrichter 32 zugeführt, dessen Ausgang mit einem zweiten Eingang des Dividierers 30 in Verbindung steht. Das Ausgangssignal des Bandpaßfilters 28 gelangt zudem über einen Gleichrichter 33 auf einen zweiten Eingang des Dividierers 31, dessen Ausgangssignal wiederum zwei Regelgrößen-Bildnern 34 und 35 zugeführt ist. Auf einen dritten Regelgrößen-Bildner 36 wird lediglich das Ausgangssignal des Dividierers 30 gegeben. Das Ausgangssignal dieses Regelgrößen-Bildners 36 wird auf einen Normalverstärker 37 und auf einen Umkehrverstärker 38 gegeben und von dort einem Ausgang 39 bzw. 40 zugeführt. Dagegen werden die Ausgangssignale der Regelgrößen-Bildner 34, 35 über jeweils einen PID-Regler 41 bzw. 42 den Ausgängen 40 bzw. 39 zugeführt. An diesen Ausgängen 39, 40 stehen dann die Regelgrößen  $x_1$ ,  $x_2$  an, die auf die Stellmotoren 23, 24 gegeben werden, wie es die Fig. 1 zeigt.

Außerdem wird das Signal  $\sim U_A$  über ein Bandpaßfilter 50 und einen Gleichrichter 52 auf einen Dividierer 54 gegeben. Ein weiteres Signal  $\sim U_2$  wird über ein Bandpaßfilter 51 und einen Gleichrichter 53 auf einen weiteren Dividierer 55 gegeben.

Auf die Schaltungsanordnungen der Fig. 1 bzw. Fig. 2 wird die Fuzzy-Logik angewandt. Hierbei handelt es sich um eine unscharfe Logik, die Wahrheitsgrade einer Aussage (linguistische Variable) zwischen 0 und 1 verarbeitet. Die Anzahl der "Wahrheitsstufen" richtet sich nach der konkreten Realisierung. Dafür gibt es sowohl analoge (kontinuierliche) als auch mehrwertige digitale (quantisierte) Realisierungen. Wichtigste Grundoperationen der Fuzzy-Logik sind das Fuzzy-UND (Minimumoperator), das Fuzzy-ODER (Maximumoperator) und das Fuzzy-NOT (Negation). Der Minimumoperator bildet stets das Minimum der Wahrheitsgrade mehrerer Variabler, z. B.  $\text{MIN}(0,5; 0,8; 0,2) = 0,2$ . Der Grenzfall ist in der binären Logik das UND, d. h.  $\text{AND}(0; 1) = \text{MIN}(0; 1) = 0$ . Der Maximumoperator bildet stets das Maximum der Wahrheitsgrade mehrerer Variabler, z. B.  $\text{MAX}(0,5; 0,8; 0,2) = 0,8$ . Der Grenzfall ist in der binären Logik das ODER, d. h.  $\text{OR}(0; 1) = \text{MAX}(0; 1) = 1$ . Für das Schlußfolgern bzw. Verarbeitung von fuzzifizierten Größen (Variablen) ist aber oft das UND nicht opti-

mal, da es bei der Minimumbildung and re Gesichtspunkte, die mit einem etwas größeren Wahrheitsgrad auftreten und die zu einer gewissen Kompensation für die Aussage führen könnten, nicht berücksichtigt. Deshalb ist noch das kompensatorische UND (Gammaoperator) eingeführt worden. Durch die Wahl eines Parameters  $\gamma$  ( $0 < \gamma < 1$ ) kann ein Operator fließend von einem Minimumoperator ( $\gamma = 0$ ) bis zu einem Maximumoperator ( $\gamma = 1$ ) eingestellt werden. Die Fuzzy-Negation ist einfach die Komplementbildung ( $F' = 1 - F$ ) der Fuzzy-Variablen  $F$ . Auch hier ist die Negation der binären Logik als Grenzfall enthalten ( $\text{NOT}(0) = 1 - 0 = 1$  bzw.  $\text{NOT}(1) = 1 - 1 = 0$ ). Grundprinzip der Verarbeitung dieser unscharfen Informationen ist die Produktregel WENN ... DANN. Die Anwendung der Fuzzy-Logik kann u. U. zu optimaleren Systemkonzepten bzw. Systemlösungen, z. B. in der Regelungstechnik, führen, da unscharfe Aussagen oft besser der Wirklichkeit entsprechen als die binäre Aussage wahr (1) bzw. falsch (0).

In einem solchen Fuzzy-System werden drei Strategien überlagert:

1. Messung der Plasmaimpedanz, Berechnung der erforderlichen Kapazitätswerte, Einstellung der Kondensatoren (zuverlässig bei Fehlanpassung, schnell, jedoch nicht genau)
2. Messung der Matchbox-Eingangsimpedanz, Bildung von  $G'$ -Stellsignalen aus der Abweichung von der Kalibrierung (genau bei guter Anpassung, schlechtes Fangverhalten bei Fehlanpassung)
3. Minimierung der Generator-Pr-Anzeige (automatisch schwierig, wird jedoch zur Kalibrierung benötigt).

Damit ist die Regelung ein überbestimmtes System. Es werden zunächst drei unabhängige Strategien gebildet, die teilweise mehr auf empirische Aussagen, teilweise auf vereinfachten Systembeschreibungen basieren. Die Aussagen dieser Strategien müssen geeignet überlagert werden. Fallunterscheidungen und Umschaltungen kommen nicht in Frage, da dies zu Instabilitäten und Schwingungen führen würde, weil sich die verschiedenen Strategien durchaus widersprechen können. Hier kommt ein Fuzzy-Regelsystem zum Einsatz. Dies ermöglicht die Realisierung eines verlässlichen Verhaltens, wenn alle Einzelinformationen unsicher sind, dafür in ihrer Anzahl jedoch Redundanz zur Verfügung steht. Die verschiedenen Strategien werden in der Fuzzy-Syntax formuliert und parallel angewendet.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum automatischen Abstimmen eines Anpassungsnetzwerks, das zwischen einer elektrischen Energiequelle und einer Last angeordnet ist, dadurch gekennzeichnet, daß ein Autotuning-Regler eingesetzt wird, der als Fuzzy-System arbeitet.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Last eine Plasmastrecke ist, daß die Impedanz dieser Plasmastrecke gemessen wird und daß die Kapazität der Kondensatoren des Anpassungsnetzwerks nach der Messung der Plasmaimpedanz berechnet und entsprechend eingestellt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Eingangsimpedanz des Anpassungsnetzwerks gemessen wird und daß die Kapazität der Kondensatoren des Anpassungsnetzwerks nach der Messung der Eingangsimpedanz berechnet und entsprechend eingestellt wird.

sungsnetzwerks gemessen wird, daß bei einer Abweichung der Eingangsimpedanz von einem vorgegebenen Wert aus dem Differenzbetrag der Impedanz ein Stellsignal für die Kondensatoren des Anpassungsnetzwerks ermittelt wird und der bzw. die Kondensatoren entsprechend eingestellt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Wirkleistung der Energiequelle minimiert wird.

5. Verfahren nach den Ansprüchen 2 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die drei Verfahren in einem Fuzzy-System überlagert werden.

6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß nach der Minimierung der Wirkleistung der Energiequelle eine Kalibrierung des Anpassungsnetzwerks erfolgt.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

20

25

30

35

40

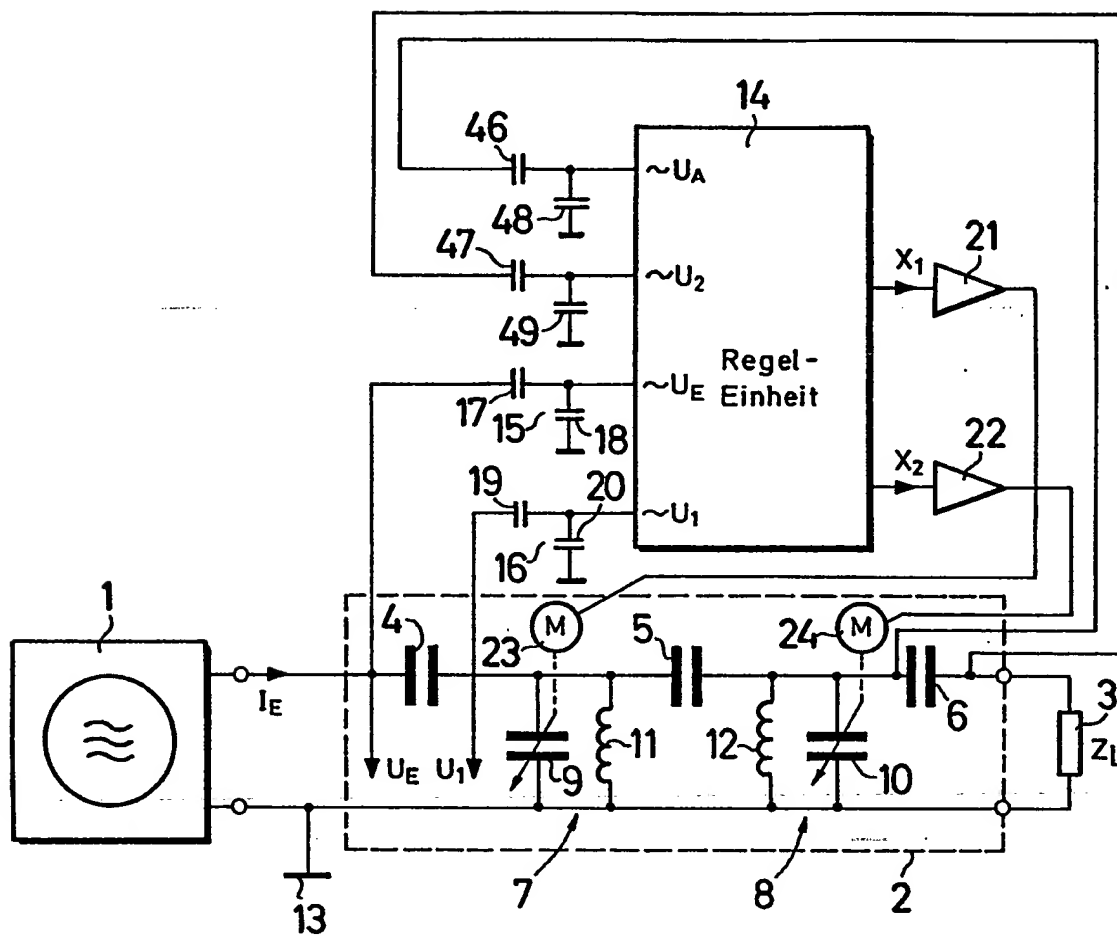
45

50

55

60

65

FIG.1 

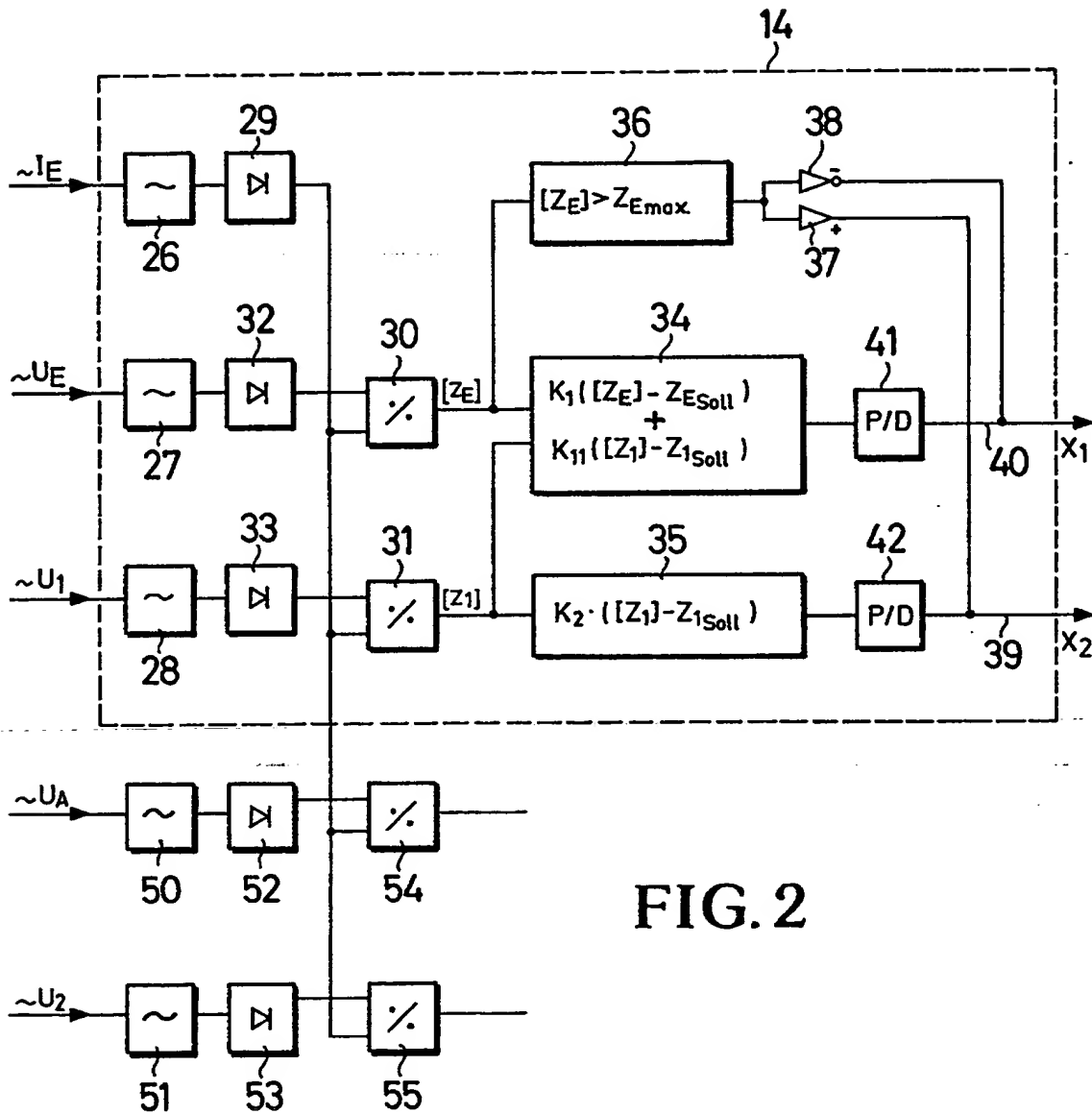


FIG. 2